



風の乱れの影響を考慮した風環境評価指標に関する研究

著者	赤星 明紀
号	62
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5526号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00125058

	あかほし	あきのり
氏 名	赤 星	明 紀
授 与 学 位	博士 (工学)	
学 位 授 与 年 月 日	平成30年3月27日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 都市・建築学専攻	
学 位 論 文 題 目	風の乱れの影響を考慮した風環境評価指標に関する研究	
指 導 教 員	東北大学教授 植松 康	
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 植松 康	東北大学教授 持田 灯
	東北大学教授 石田 壽一	

論 文 内 容 要 旨

第1章 序論

本研究の目的は、歩行者の風に対する印象や風害と風の乱れの関係を検討することにより、風工学研究所の風環境評価指標に対する風の乱れの影響を明らかにするとともに、風の乱れの影響を考慮した新しい風環境評価指標を提案することである。我が国の環境アセスメント等の風環境調査で用いられる風環境評価指標として、風工学研究所による風環境評価指標（以下、風工評価指標）と、村上らによる風環境評価指標（以下、村上評価指標）の二つが一般に用いられている。風工評価指標は三杯型風速計（以下、三杯型）による平均風速と街並みの関係から定められており、数多くの風観測データに基づいている点や、風環境と街並みの関係に着目している点、さらに簡便に適用可能であることから合理的な指標であると考えられ、広く使われてきた。一方で、風環境を考えるうえで重要となる、人の風に対する印象や風害との関係については明らかにされていない。また、乱流中における応答の遅れや回り過ぎを古くから指摘されてきた三杯型による風速の統計量や、人の風に対する印象や風害は風の乱れに影響される。すなわち、風工評価指標は風の乱れの影響が考慮されておらず、その影響についてはこれまで検討された例はない。また、近年の都市の状況の大きな変化に伴い、人々の風に対する意識も変化していると考えられる。さらに、三杯型に替わって高性能化、低価格化した超音波型風向風速計（以下、超音波型）の利用が増加している。こうした背景から、風工評価指標に対する風の乱れの影響を検討し、風の乱れの影響を考慮した新たな風環境評価指標を提案することが求められる。風工評価指標と風の乱れの関係の検討および風の乱れの影響を考慮した新しい風環境評価指標の提案については、複数の超高層建物と多くの低中層建物を有する東京都品川区上大崎およびその周辺地区（以下、上大崎）における風・気温観測、風洞実験および歩行者を対象とした風に関するアンケート調査を行い、それらの結果を用いて検討する。また、三杯型による統計量に対する風の乱れの影響については、三杯型と超音波型による統計量の比較を行うとともに、その統計量の差と乱れの関係について検討する。そしてその関係から、両者の統計量の差を補正する式、および逆変換する式を提案する。

第2章 乱れの強さ・ガストファクター・ピークファクターの関係

風の乱れの影響を考慮した風環境評価指標を提案するにあたり、風の乱れの統計量を正しく把握することが重要である。そこで、乱れの強さ、ガストファクター（以下、GF）、ピークファクター（以下、PF）について、それぞれの関係を検討した。様々な地表面粗度、観測高さにおける風観測データと、石川（2004）が提案している PF の評価式と確率論的手法を用いて、PF と乱れの強さの関係式を提案した。

第3章 三杯型と超音波型による統計量の差の検討

三杯型・矢羽型風向計と超音波型を様々な場所に併設し、平均風速・最大瞬間風速・乱れの強さ・GF・PF・最多風向・風向変動の比較を行った。平均風速は都市部地表面付近で平均的には約 2.6 割、高い場合には約 4 割三杯型による値が過大となり、最大瞬間風速は 1 割程度三杯型による値が過大となった。一方、乱れの強さは 0.5～3 割程度、GF は 0.5～2 割程度、三杯型による値が過小となった。また、PF、最多風向、風向変動の差は小さかった。平均風速、最大瞬間風速、乱れの強さ、GF について、三杯型と超音波型による値の比の平均値を求めたところ、乱れの強さの比および GF の比は、平均風速の比が大きいほど小さな値を示す傾向にあった。平均風速、最大瞬間風速については風向変動との関係を、乱れの強さおよび GF については平均風速の比の平均値との関係を検討した（図 1）。図 1 に示す近似式を各統計量の差の補正式として、これらの逆数を逆変換式として提案した。

第4章 上大崎における観測

上大崎において、観測点 MG1～MG6 の 6 地点における地上風観測（観測高さ 3～5m）と、観測点 MG6 における気温観測（観測高さ 3m）、超高層建物（高さ約 115m）の屋上 4 地点（観測点 MGO～MGR）における上空風観測を実施した。観測点 MG1～3 は比較的風が強く、観測点 MG4～6 は比較的風が穏やかな場所であった。屋上観測点から求めた風向出現頻度から、上大崎上空においては北および南の頻度が卓越することが示された。

第5章 上大崎の風況に関する風洞実験

上大崎を対象として熱線風速計を用いた風洞実験を行い、風速比、ガストファクター、乱れの強さを測定した。熱線風速計を用いた測定結果とサーミスタ風速計を用いた測定結果の風向別風速比を比較した結果、両者は概ね対応し、熱線風速計のセンサーとサポートの影響は小さいことを確認した。また、風向別風速比、ガストファクター、乱れの強さについて、実験値と観測値の比較を行った。風向別風速比は両者がよく対応したものの、ガストファクターおよび乱れの強さは実験値が 20%程度過小評価となった。

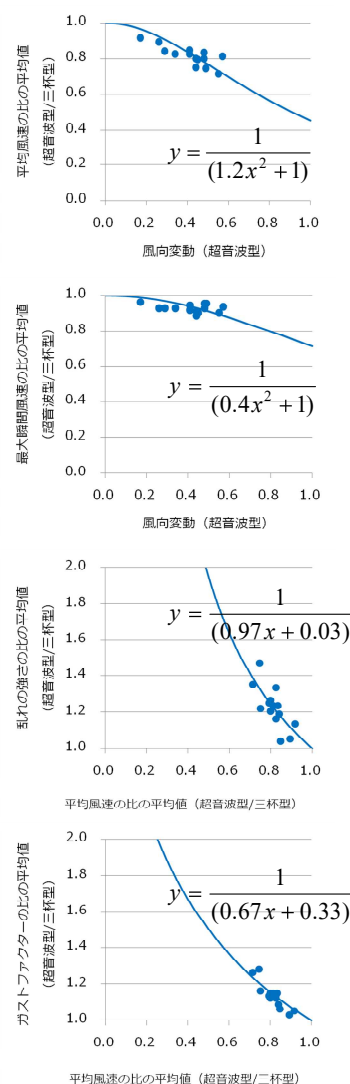


図1 三杯型と超音波型による各統計量の比と風向変動・平均風速の比の平均値の関係

第6章 上大崎におけるアンケート調査

上大崎の居住者、通勤・通学者などの歩行者を対象に風に関するアンケート調査を行った。質問の内容は村上ら（1983）のアンケートに倣った（表1）。回答者は2017年10月現在において38名である。また、2016年5月～2017年8月の期間において、3664回答を得た。

第7章 観測結果・実験結果・アンケート調査結果の関係

平均風速・乱れの強さと風の強さに対する印象の関係について、評価時間を1日および1時間とした場合で検討した。どちらの場合においても、平均風速が高いほど、乱れの強さが大きいほど風を強く感じる傾向にあり、その傾向は評価時間を1時間とした場合の方がより明確であることを確認した。また、重み係数 $k=3$ とした有効風速（式1）と風の強さに対する印象の相関が高いことを示し、 $k=3$ とした有効風速と風の強さに対する印象の関係について整理した（表2）。同様に、風速・気温と風の寒暖に対する印象の関係についても検討し、 $k=0$ とした有効風速（＝平均風速）を用いて、表3のように整理した。風速と体験・目撃事象の関係については、 $k=PF$ とした有効風速（＝最大瞬間風速）で検討した。 $k=PF$ とした有効風速の2乗と体験・目撃事象の報告頻度の相関が高いことが確認でき、このことは中村ら（2016）が提案した指標の内容にもよく対応する。

第8章 風の乱れの影響を考慮した風環境評価指標の提案

東京都心およびその近郊における33地点の観測点を対象に、風工評価指標と風の強さに対する印象の関係を検討した。累積頻度55%と95%の平均風速と表2の関係から求めた風の強さに対する印象の相対頻度の関係を調査し、累積頻度95%と風の強さに対する印象の相関が高いことを示した（図2）。また、それらの関係がワイブル分布で近似できることを示した。累積頻度55%、95%の平均風速と風の寒暖に対する印象の関係についても同様に検討し、気温25℃以上における累積頻度55%の平均風速と風の寒暖に対する印象の相関が高いことを示し、ワイブル分布で近似した結果も示した。また、評価時間1時間を10分間に変換する目的で、有効風速および気温について、評価時間1時間の値と10分間の値を比較した。その結果、 $k=3$ とした有効風速と気温については評価時間1時間の値と評価時間10分間の値に概ね差が無

表1 アンケートの質問内容

質問1：あなたの回答エリアにおける今日1日の風に対する印象をお尋ねします。
回答①：ほぼ無風状態であった。
回答②：特に風を意識しなかった。または風の吹き方が適度であった。
回答③：不快とは感じなかったが、風はやや強いと感じた。
回答④：風が強く不快であった。
回答⑤：風のために危険を感じるほどではなかったが、強い風を感じた。
回答⑥：風のために危険を感じた。
質問2：あなたの回答エリアにおける今日1日の風の印象と気温の関係についてお尋ねします。
回答A：無風状態で非常に暑かった。
回答B：涼むために、もう少し風が吹けばよいと思った。
回答C：風が心地よいと感じた。
回答D：寒暖を感じなかった。
回答E：風によって寒さが増した。
回答F：肌が痛むほど風を冷たく感じた。
質問3：以下のようなことを体験・目撃された方にお尋ねします。体験・目撃した時間と場所をお尋ねします。
体験・目撃①：髪や衣服が乱れた。
体験・目撃②：歩きにくかった。吹き飛ばされそうになった、転倒した。
体験・目撃③：傘がさしにくかった。傘が壊れた。
体験・目撃④：駐輪した自転車、バイクが転倒した。
体験・目撃⑤：ゴミの舞い上がり、吹き溜まりがあった。
体験・目撃⑥：風が強く外に出られる状態ではなかった。

$$U_e = U + k\sigma_u = U(1 + kI_u) \quad (\text{式1})$$

ここに、

$$\begin{aligned} U_e &: \text{有効風速 (m/s)} & U &: \text{平均風速 (m/s)} \\ k &: \text{重み係数} & I_u &: \text{乱れの強さ} \\ \sigma_u &: \text{変動風速の標準偏差} \end{aligned}$$

表2 $k=3$ とした1時間有効風速と風の強さに対する印象の関係

$U_{e,1h} \leq 6\text{m/s}$	(風の強さに対する印象Ⅰ) 風を特に意識しない
$6\text{m/s} < U_{e,1h} \leq 8.5\text{m/s}$	(風の強さに対する印象Ⅱ) 風はやや強いと感じる
$8.5\text{m/s} < U_{e,1h} \leq 11\text{m/s}$	(風の強さに対する印象Ⅲ) 風が強く不快である
$U_{e,1h} > 11\text{m/s}$	(風の強さに対する印象Ⅳ) 風を危険に感じる

表3 $k=0$ とした1時間有効風速・気温と風の寒暖に対する印象の関係

$U_{1h} \leq 1\text{m/s}$ (気温25℃以上)	(印象a) 風が弱く、暑いと感じる
$1\text{m/s} < U_{1h} \leq 5\text{m/s}$ (気温25℃以上)	(印象b) 風を心地よいと感じる
$U_{1h} > 3\text{m/s}$ (気温10℃未満)	(印象c) 風で寒さが増す
上記以外	(印象d) 寒暖差を感じない

いこと、および $k=PF$ とした有効風速の評価時間を 1 時間から 10 分間に変換する方法を示した。図 2 の関係から風工評価指標の領域の境界値に対応する累積頻度 95%の有効風速を求め、風の乱れの影響を考慮した風環境評価指標を提案した。そして気温 25℃以上の累積頻度 55%の平均風速と風の寒暖に対する印象の関係から弱風問題を対象とした評価指標を提案し、さらに中村ら (2016) の評価指標を引用して強風問題を対象とした評価指標を定めた。これら 3 つの指標を組み合わせることで、評価対象に応じた風環境評価指標を新たに提案した (表 4)。

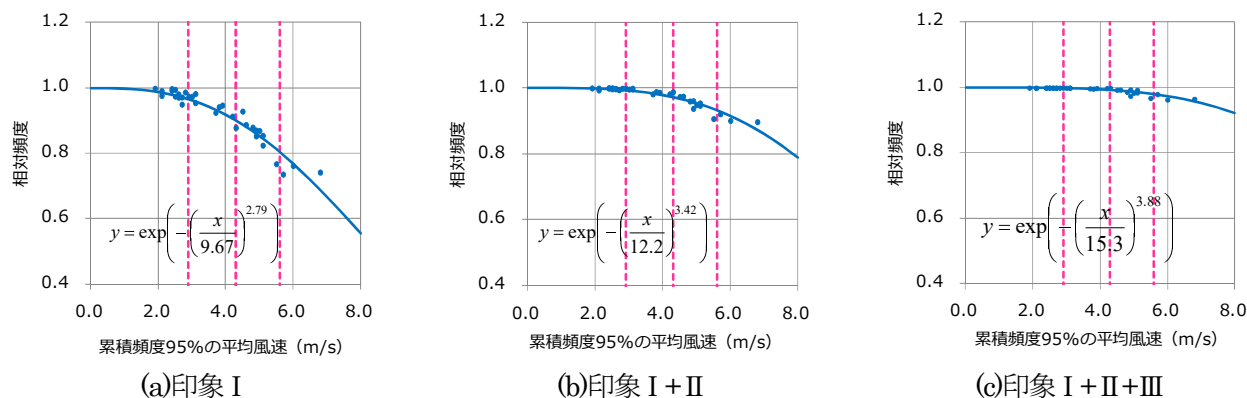


図 2 累積頻度 95%の平均風速と風の強さに対する印象の相対頻度の関係

(青プロット：観測結果，赤破線：風工評価指標の領域の境界値，青線：ワイブル分布による近似曲線)

表 4 評価対象に応じた風環境評価指標 (風速：有効風速 評価時間：10 分間)

弱風問題		弱～強風問題		強風問題	
累積頻度 55%の風速(m/s) (平均気温 25℃以上の場合)		累積頻度 95%の風速(m/s)		風速の 2 乗の年間平均値(m/s) ² (中村らの指標)	
$k=0$		$k=3$		$k=$ ピークファクター (式(3))	
非適風	$\leq V$ (式(2))	領域 A	≤ 5.4	レベル 1	< 16
		領域 B	≤ 7.4	レベル 2	< 24
		領域 C	≤ 9.2	レベル 3	≥ 24
		領域 D	> 9.2		

$$V = 1.28 \left\{ -\ln \left(\frac{0.1}{P_{T25}} \right) \right\}^{0.63} \quad (\text{式 } 2)$$

$$g_{10} = 2.28 I_{u,10} + 2.54 \quad (\text{式 } 3)$$

ここに,

V : 印象 a の頻度が 10%となる累積頻度 55%の平均風速 (気温 25℃以上の場合) (m/s)

P_{T25} : 気温 25℃以上となる割合 (≥ 0.1)

ここに,

g_{10} : ピークファクター
(平均化時間 600 秒, 観測高さ 3m)

$I_{u,10}$: 10 分間平均乱れの強さ

第9章 結論

風工評価指標に対する風の乱れの影響を明らかにし、その影響を考慮した新たな風環境評価指標を提案した。さらに評価対象に応じた評価指標を提案し、有効風速という 1 つの統計量で様々な風環境問題を評価することが可能であることを示した。また、三杯型による風速の統計量を超音波型による値に補正する補正式およびその逆変換式を用いることにより、風工評価指標、村上評価指標、新指標のいずれに対しても、三杯型と超音波型の両方の統計量を適用することが可能である。

論文審査結果の要旨

環境アセスメント等の風環境調査で用いられる風工学研究所による風環境評価指標（以下、風工評価指標）が提案された数十年前から現在にかけて都市の状況は大きく変化した。また、用いられる風速計は三杯型風速計（以下、三杯型）から超音波型風速計（以下、超音波型）へと変化してきている。風工評価指標は三杯型による平均風速と街並みの関係から定められており、風の乱れの影響や人の風に対する印象や風害との関係も考慮されていない。

本研究は、三杯型による風の統計量に対する乱れの影響と、風工評価指標と風の乱れ、風の印象、および風害との関係を検討することにより、風の乱れの影響を考慮した新しい風環境評価指標を提案することを目的としている。三杯型による統計量に対する風の乱れの影響については、様々な地点における三杯型と超音波型の並列観測によって検討している。風工評価指標に対する風の乱れの影響や人の風の印象、風害との関係については、東京都品川区上大崎における風・気温観測、風洞実験、歩行者を対象とした風に関するアンケート調査の結果を用いて検討している。本編は全9章で構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、風の乱れに関する重要な統計量である乱れの強さ・ガストファクター・ピークファクターの性状について、観測結果と確率論的手法に基づき、ピークファクターと乱れの強さの関係式を提案した。

第3章では、三杯型と超音波型の並列観測から得られた各統計量の比較を行い、両者の差と風の乱れの関係について検討し、三杯型による値を超音波型による値に補正する式を提案した。

第4章では、上大崎における風・気温観測の概要と観測結果について述べている。

第5章では、上大崎の風況に関する風洞実験の概要と実験結果について述べている。

第6章では、上大崎におけるアンケート調査の概要と調査結果について述べている。

第7章では、上記の観測、風洞実験、アンケート調査の結果に基づき、風速の統計量として有効風速

$(\bar{U} + k \cdot \sigma_u, \bar{U} : \text{平均風速}, \sigma_u : \text{変動風速の標準偏差}, k : \text{重み係数})$ を用いて、 $k=3$ とした有効風速

と風の強さに対する印象の関係、 $k=0$ とした有効風速（＝平均風速）と風の寒暖に対する印象の関係を整理した。また、風害の体験・目撃の頻度が k =ピークファクターとした有効風速（＝最大瞬間風速）の2乗で表現できることを示し、中村ら（2016）が提案した指標とよく対応することを示した。

第8章では、有効風速と風の強さに対する印象の関係から、風工評価指標と風の強さに対する印象の関係を検討している。 $k=3$ とした有効風速を基準とし、乱れの影響を考慮した風環境評価指標を提案した。また、 $k=0$ とした有効風速（＝平均風速）・気温と風の寒暖に対する印象の関係から、弱風問題を対象とした評価指標を提案した。さらに、 k =ピークファクターとした有効風速（＝最大瞬間風速）を基準とし、強風問題を対象とした評価指標を提案した。これらにより評価対象に応じた新しい風環境評価指標を提案した。

第9章は結論である。

以上、要するに本論文は、風工評価指標に対する風の乱れの影響や風に対する印象・風害との関係を明らかにするとともに、風の乱れの影響度合いを変化させることで対象とする問題に応じた評価を可能とする新たな風環境評価指標を提案したもので、今後ますます重要となる風環境調査の発展に寄与すると期待される。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。